

# 中国东北地区 410 间断面结构及其动力学启示

王小虎, 薛 静

(成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059)

**摘要:** 地幔过渡带是地球内部重要的储水带, 其内部间断面的厚度及两侧地震波的速度跃变可对过渡带附近的含水量和矿物组分提供重要约束。笔者利用中国东北地区 4 个流动台阵的公开地震数据, 提取出多频段 Pds 转换波的振幅信息, 基于马尔科夫链蒙特卡罗方法(MCMC)同时反演获得了该地区 410 km 间断面的厚度及两侧的横波速度跃变值。结果显示, 中国东北地区 410 间断面厚度达到~25 km, 横波速度在该深度范围内增加了约 6.9%。笔者认为滞留于过渡带底部的太平洋板块持续脱水, 增加了过渡带顶部的含水量(>0.5 wt %), 使该处矿物处于或高于流体饱和状态, 导致该处矿物发生部分熔融, 形成低速低阻异常体的同时使 410 间断面相较于无水情况(~7 km)发生了显著增厚。

**关键词:** 中国东北; 接收函数; 马尔科夫链蒙特卡罗法; 410 km 间断面; 含水量

**中图分类号:** P631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.04.02

## 0 引言

地幔过渡带(Mantle Transition Zone, MTZ)的上下界面是地球内部重要的地震间断面, 它们的平均深度分别为~410 km 和~660 km(以下简称 410 间断面和 660 间断面)。通常认为 410 间断面处发生橄榄石( $\alpha$  相)到瓦兹利石( $\beta$  相)的相变, 该过程具有正的克拉珀龙斜率( $dP/dT > 0$ ), 而在 660 间断面处, 林伍德石( $\gamma$  相)转化为钙钛矿(perovskite)和铁方镁石(ferropericlasite), 该过程具有负的克拉珀龙斜率( $dP/dT < 0$ )<sup>[1-3]</sup>。相变过程受热力学参数的控制, 在温度横向变化的区域, 因这两种相变具有符号相反的克拉珀龙斜率, 410 和 660 间断面会拥有相反的深度变化。因而在上地幔温度相对较低时(如俯冲板块附近), 410 界面会抬升, 660 界面会下沉, 导致过渡带整体厚度增厚; 而在相对高温的环境下(如地幔柱附近), 过渡带厚度则会减薄<sup>[4]</sup>。因此, 地幔过渡带间断面的深度, 特别是地幔

过渡带的厚度可以用来推测上地幔温度的空间变化。

橄榄石相变使得间断面两侧矿物的弹性性质及体积含量发生显著改变, 导致除了地球自身压缩外的速度和密度变化。在一维全球速度模型 IASP91<sup>[5]</sup>中, 地幔过渡带间断面作为一阶速度间断面处理, 在 410 和 660 间断面处的横波速度跃变分别为~4.10%与 6.25%。但是, 矿物物理学高温高压实验表明, 参与相变的端员矿物相能够在一定温压范围内共存, 相变界面并非一阶间断面, 所产生的地震波速度和密度变化也会发生在一定的深度范围内, 这个深度范围被称为相变面的厚度或锐度(图 1)。地幔过渡带顶部的 H<sub>2</sub>O 含量、Fe/Mg 比例以及非橄榄岩组分都会影响 410 间断面的深度和厚度。以 Fe# (Fe# = 100 Fe/(Fe + Mg))为 10 的地幔岩(pyrolite)成分为例, 在不含水的条件下, 橄榄石-瓦兹利石的相变区间在 7 km 左右; 而当含水量增加到 0.4 wt%时, 410 间断面的厚度则增厚到 11 km<sup>[6]</sup>。因此, 410 间断面的厚度往往能够反映地幔过渡带顶部的 H<sub>2</sub>O 含量。Irfune 和 Isshi-

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(41904086)

第一作者: 王小虎(1998-), 男, 硕士, 主要从事地震学研究, E-mail: wxh9824@outlook.com。

ki<sup>[7]</sup>通过高温高压实验发现,橄榄石体系中的 Mg 含量随压力增加而增加。完成橄榄石—瓦兹利石相变后纵横波速度的跃变值约为等化学(isochemical, Mg# = 89)相变情况下的 90%,据此推测的地幔橄榄石含量较后者情况下增加~4 vol%~5 vol%。因此,准确获取间断面两侧波速和密度的变化能够为推测间断面附近的物质组成提供很好的约束。

地幔过渡带间断面在震学、地球动力学、地球化学等方面具有独特特征,但一般来说很难直接获取地幔过渡带处的岩石样本。地震波作为一种在地下介质中传播的机械波,能够穿透整个地球,地震波的走时和振幅信息能够很好地用于推断间断面的埋深、厚度以及间断面两侧的物性差异。结合矿物物理学和高温高压实验对地幔过渡带处的物质组成、温度结构和物理性质进行约束,进而帮助我们认识地球内部物质的组成和演化、地幔对流模式,特别是深俯冲过程对地幔物质循环、能量交换等影响<sup>[8-9]</sup>。

中国东北地区位于欧亚板块东缘,西伯利亚和华北克拉通之间。受西太平洋板块俯冲作用的影响,该区中深源地震频发,分布着广泛的新生代火山活动。众多地震成像结果显示,西北太平洋板块在日本海沟处以较低角度(~30°)开始向西俯冲,在我国东北地区下方的地幔过渡带底部发生弯折,后继续向西延伸约 1 500 km,到达大兴安岭—太行山重力梯度带的东部<sup>[10-13]</sup>。接收函数和 ScS 多次波研究表明,受俯冲板片的影响,该地区 660 间断面出现不同程度的下沉<sup>[13-16]</sup>。前人利用 SS 前驱波、ScS 多次反射波、三重震相及接收函数等方法均发现 410 间断面有整体的下沉趋势<sup>[15-18]</sup>,这与深俯冲动力学背景下低温度异常对间断面起伏的影响并不一致,体现了该区域 410 间断面很可能受到温度和物质成分异常共同作用<sup>[19]</sup>。以上大多数的研究主要集中于间断面地形起伏,而缺少对间断面厚度的研究。

笔者利用接收函数方法分离来自地幔过渡带间断面的 Pds 转换波(射线路径如图 1(a)所示),提取不同频段的 Pds 转换波与直达 P 波之间的振幅比(Pds/P),使用马尔科夫链蒙特卡罗方法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)基于 Metropolis-Hastings 采样算法<sup>[20]</sup>进行参数概率反演,获得了中国东北地区 410 间断面的厚度及其两侧横波的速度跃变。结合高温高压矿物相变实验和矿物物理模型计算,给出了该区域地幔间断面顶部含水量较大的可能原因。为认识深俯冲动力学背景下地幔过渡带相变界面的物理结构和起伏特征及其内部的物质组成

和能量交换提供了新的地震学约束。

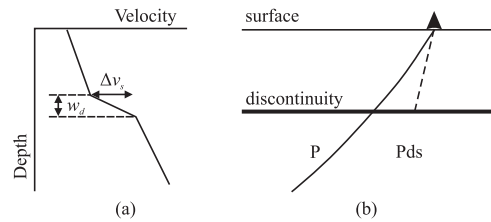


图 1 间断面处的横波速度结构与 Pds 转换波射线路径示意图  
Fig. 1 The shear wave velocity structure and the raypath for the Pds conversion at the discontinuity

## 1 研究方法与数据

### 1.1 反演方法及其理论测试

接收函数是研究台站下方速度间断面及其结构性质的典型手段之一。在震中距大于 30°的情况下远震 P 波被视作近垂直入射,当其遇到台站下方的地震间断面时会产生 Pds 转换波与多次反射波震相。通过远震 P 波垂向与径向分量的反褶积,去除了震源、源区介质、传播路径和仪器响应等因素,最后得到只包含接收区介质结构响应的时域波形序列,将其称为接收函数<sup>[21]</sup>。

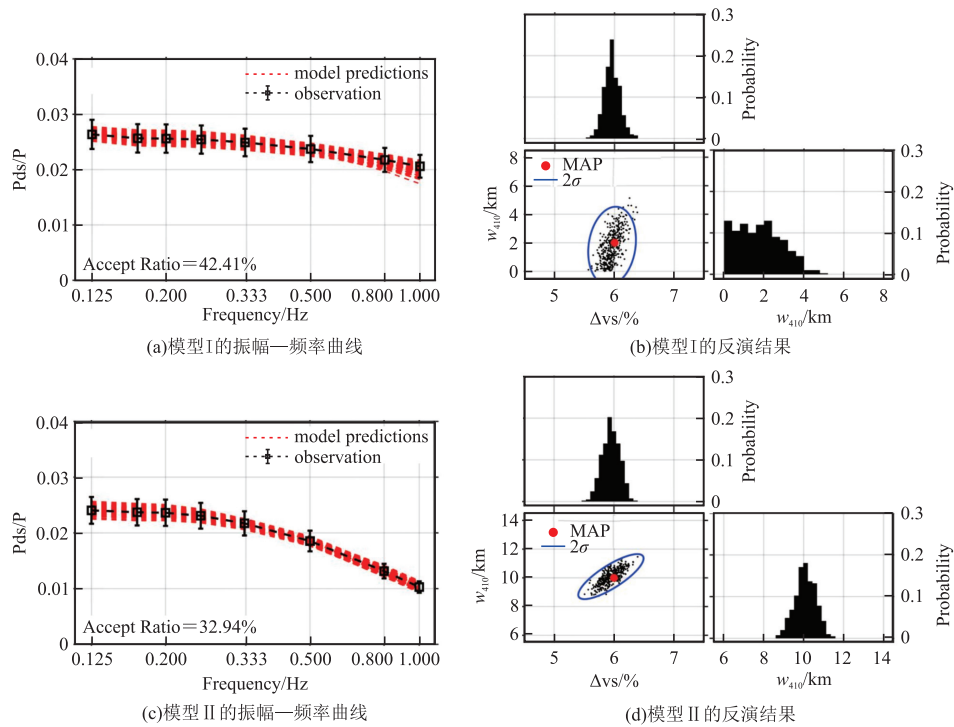
在实际波形数据中,反射波和折射波等地震波是否可见取决于间断面的结构和观测所用频率,仅当间断面厚度小于地震波波长的 1/4 时可见。也就是说高频地震波仅对尖锐的速度变化敏感,而更厚的间断面往往需要更长的波长,即更低的频率来观测<sup>[22-23]</sup>。所以研究间断面的厚度和速度变化,仅靠单一频段的地震信号是非常困难的<sup>[24]</sup>。

因为利用 Pds/P 振幅比反演间断面模型参数( $w_{410}$  和  $E\Delta v_s$ )是一个非线性过程。根据贝叶斯定理,在存在观测数据向量  $\mathbf{d}$  时,模型参数  $w_{410}$  和  $\Delta v_s$  的条件概率分布,即后验概率分布可表达为:

$$q(\mathbf{m}|\mathbf{d}) = \frac{f(\mathbf{d}|\mathbf{m})p(\mathbf{m})}{p(\mathbf{d})}$$

式中,  $\mathbf{d}$  是整个观测数据向量,即所有频段下的 Pds/P 振幅比,  $\mathbf{m} = [w_{410}, \Delta v_s]$  为模型参数向量,  $q(\mathbf{m}|\mathbf{d})$  是模型参数的后验概率分布,  $f(\mathbf{d}|\mathbf{m})$  为数据的似然函数,  $p(\mathbf{m})$  和  $p(\mathbf{d})$  分别代表模型参数和数据的先验概率,后者对于所有观测数据都相同,通常被视为常数。观测数据的不确定性假设服从高斯分布,则似然函数可表示为:

$$f(\mathbf{d}|\mathbf{m}) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[G(\mathbf{m})_i - \mathbf{d}_i]^2}{2\sigma_i^2}\right)$$



(a)(c)中黑色方块代表观测数据红色虚线代表反演过程中各接受模型的振幅比;(b)(d)中黑色直方图代表反演所得模型参数的概率分布

图2 理论模型参数反演测试

Fig. 2 Synthetic test of theoretical models

式中,  $n$  为滤波频段的总数,  $\mathbf{d}_i$  代表由各频段 Pds/P 振幅比组成的数据向量,  $\sigma_i$  为对应的不确定性,  $G(\mathbf{m})_i$  则代表由模型参数得到 Pds/P 振幅比的非线性正演过程。在进行 MCMC 反演之前, 我们假设模型参数的先验概率都服从均匀分布, 即  $w_{410} \sim U(0, 30)$  km,  $\Delta v_s \sim U(0, 10)\%$ 。为在 11 000 次的迭代过程中不断产生新模型, 向两个参数分别加入了标准差为 1 和 0.001, 均值都为 0 的高斯扰动值, 迭代过程中根据 Metropolis-Hastings 采样算法接受或拒绝新的模型。迭代完成后从整个接受模型空间中去掉前 1 000 组并每隔 10 步保留一个模型, 将最后得到的 1 000 组模型参数作为反演参数的概率分布。

为了检验多频段 Pds 转换波振幅反演方法对约束 410 间断面参数(厚度  $w_{410}$  和横波速度跃变  $\Delta v_s$ )的有效性和可靠性, 我们对理论模型的振幅-频率曲线进行了试验。理论接收函数的计算和 Pds 振幅的拾取方法参照了薛静等人<sup>[24]</sup>的文章。其中, 在使用不同频段的巴特沃斯滤波器对接收函数进行滤波时, 高通截止频率均固定为 0.025 Hz。但由于地表的多次反射波在走时上与 P410s 相近, 在低通

截止频率较低的滤波频段( $\leq 0.125$  Hz), 二者波形会彼此重叠, 从而影响 P410s 振幅的拾取。因此这里在理论模型测试和实际数据处理的过程中, 滤波频段的低通截止频率最小取至 0.125 Hz 而非 0.067 Hz, 其余依次为 0.15 Hz、0.25 Hz、0.333 Hz、0.5 Hz、0.8 Hz 及 1 Hz。我们对横波速度跃变均为 6%、间断面厚度为 2 km(极薄)和 10 km(正常厚度)<sup>[6]</sup>的理论模型 I 和 II 进行 MCMC 反演测试。反演过程中接受模型所对应的振幅-频率曲线始终保持在观测误差内, 与观测曲线拟合较好(图 2(a)、(c))。所得模型参数的后验概率分布如图 2(b)、(d)所示, 左下角为模型参数的散点图, 蓝色曲线为置信椭圆, 红色十字代表拥有最大后验概率(Maximum A Posteriori, MAP)的模型参数。反演得到模型 I 的间断面厚度为  $(1.74 \pm 2.2)$  km, 横波速度跃变为  $(5.96 \pm 0.27)\%$ ; 模型 II 的间断面的厚度为  $(10.08 \pm 1.04)$  km, 横波速度跃变为  $(5.95 \pm 0.29)\%$ , 均与真实的模型参数接近。由此可见该方法能够有效获取 410 间断面的厚度及两侧的横波速度跃变值。

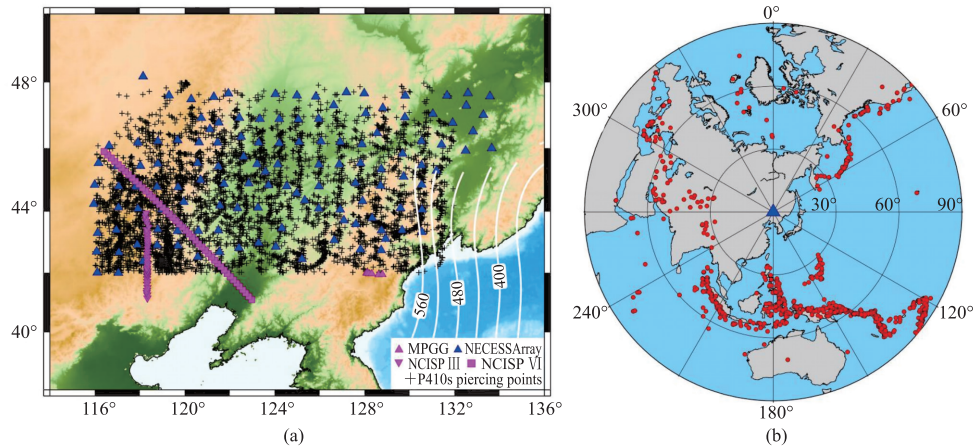
## 1.2 数据和接收函数的提取

我们从美国 IRIS (Incorporated Research

Institutions for Seismology) 数据中心收集了 4 个流动台阵的地震数据(图 3(a))。其中包括中国科学院地质与地球物理研究所“华北内部结构计划”的第三期(NCISP III, 2003—2004 年)和第六期(NCISP VI, 2007—2008 年)<sup>[25-26]</sup>的部分台站,共计 89 个,位于研究区域的西南角。另有 6 个沿 W—E 向展布的线性流动台站(Mt. Paektu Seismic Network, MPGG)<sup>[27]</sup>,由英国伦敦大学布设于朝鲜境内的白头山火山(长白山东侧),记录时间为 2013 年 8 月至 2015 年 8 月。其余 125 个流动地震台站均来自中美合作布设的 NECESSArray 台阵(NorthEast China Extended Seismic Array)<sup>[28]</sup>,记录时间为 2009 年 8 月至 2011 年 7 月。我们获取了这些台阵记录中地震事件震级  $\geq 5.5$  级、震中

距为  $30^\circ \sim 90^\circ$ 、震源深度  $\leq 100$  km 的三分量波形数据。

为保证数据质量,我们把 P 波理论到时( $T_P$ )前后 20 s ( $T_P \pm 20$  s) 内的最大振幅与此之前的 40 s 时窗( $T_P - 40 \pm 20$  s) 内的最大振幅之比定义为信噪比,只保留信噪比大于 3 的数据。随后,将 E、N、Z 分量旋转到 L、Q、T 分量上,从 L 分量上截取 P 波到前 20 s ( $T_P - 20$  s) 和到后 50 s ( $T_P + 50$  s) 之间的部分作为母波形,将完整的 L 与 Q 分量(P 波到前 20 s 和到后 200 s) 作为子波形,使用 Wiener 滤波法<sup>[29-30]</sup> 计算 L 和 Q 分量接收函数。对提取的接收函数进行质量控制,只保留 Q 分量接收函数上最大幅值不超过 L 分量上 P 波幅值 50% 的数据作进一步分析。



白色实线为俯冲板块的等深线,蓝色三角为研究区域中心位置,红点为地震事件

图 3 地震台站、地震事件和 P410s 穿透点的分布

Fig. 3 Distribution of seismic stations, seismic events and P410s piercing points

### 1.3 接收函数叠加

将上一步处理后的接收函数 Q 分量按照震中距进行叠加并排列,如图 4 所示,大多数震中距下都可以清晰地看到 P410s 和 P660s 震相。接着计算出 Pds 转换波相对直达 P 波的到时,用一维速度模型:IASP91<sup>[5]</sup> 对 Pds 转换波进行射线追踪,获得每条地震射线在 410 间断面处的穿透点位置。挑选出 P410s 穿透点位于 ( $116^\circ\text{--}132^\circ$  E,  $42^\circ\text{--}48^\circ$  N) 范围内(图 3(a)),震中距在  $50^\circ \sim 80^\circ$  之间的接收函数,并将 P410s 转换波在  $65^\circ$  震中距下的走时作为参考到时进行叠加。对叠加后的接收函数进行不同频段的滤波,图 5(a) 展示了部分滤波后的接收函数波形。从中测量并计算各频段下 P410 s/P 的相对振幅比,得到振幅 - 频率观测曲线

(图 5(b)),并用 Bootstrap<sup>[31]</sup> 方法计算出各频段的不确定性。

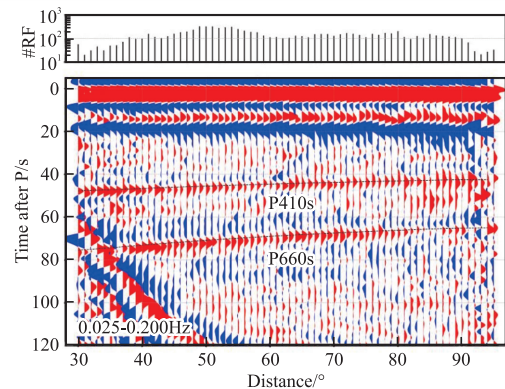


图 4 按震中距叠加的 Q 分量接收函数

Fig. 4 QRFs stacked by distance

## 2 反演结果

基于以上观测数据对间断面物理参数( $\tau_{410}$  和  $\Delta v_s$ )进行 MCMC 反演,反演过程中接受模型所对应的振幅-频率曲线与观测数据有较好拟合度(图 6(a)),

整个模型空间的接受率为 31.00%。得到了 410 间断面厚度  $w_{410}$  与间断面两侧横波速度差  $\Delta v_s$  的后验概率分布及散点图(图 6(b))。反演结果显示,中国东北地区 410 间断面厚度较大,达到了  $(25.07 \pm 2.45)$  km, 间断面两侧横波速度跃变值为  $(6.92 \pm 0.46)\%$ , 比 IASP91 模型的跃变值 4.1% 高出 2.8% 左右。

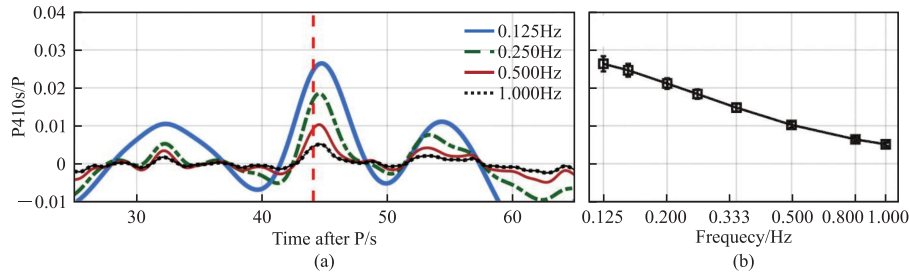


图 5 不同频段下的 P410s/P 振幅比

Fig. 5 P410s/P amplitude ratio at different frequency bands

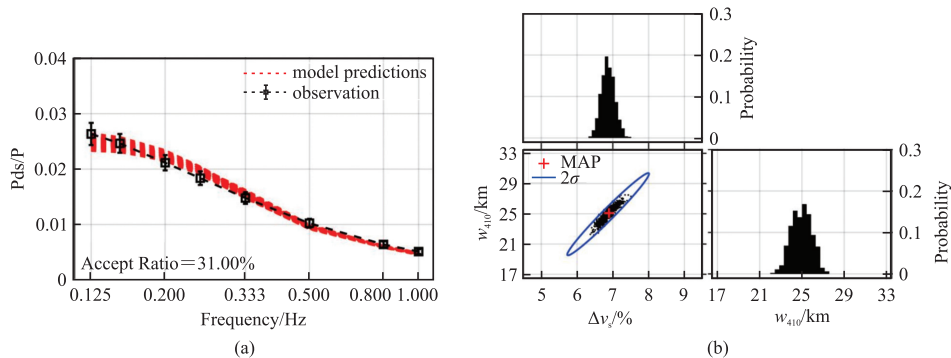


图 6 观测数据的反演结果

Fig. 6 The inversion results of observation

## 3 讨论

笔者从 IRIS 上下载了 2003—2017 年间多个地震台网的公开地震数据,利用多频段 Pds 转换波振幅反演方法,得到了中国东北地区 ( $116^{\circ}$ - $132^{\circ}$  E,  $42^{\circ}$ - $48^{\circ}$  N) 410 间断面的结构信息。由于受到空间平均作用,反演获得 410 间断面附近的 S 波速度结构实际上体现了上千平方千米范围内的整体情况。同时,认为由间断面地形起伏和波速异常结构所引起的地震波振幅的聚焦和发散等效应被平均掉了<sup>[32]</sup>。前人的地震成像结果显示,中国东北地区的 660 间断面深度在 640 km~700 km 之间,存在较多局部凹陷和抬升。相比之下,410 间断面的地形起伏总体较小,平均深度在 414 km<sup>[15, 18, 33]</sup>。因此,这里忽略了 410 间断面地形起伏对振幅的影响。

中国东北地区位于西伯利亚和东北克拉通之间,该区新生代火山活动强烈,这与太平洋板块的俯冲作用密切相关。全球和区域地震层析成像结果显示,呈高速异常的西北太平洋板块以近  $30^{\circ}$  的倾角向西俯冲至中国东北地区地幔过渡带底部,随后弯折平卧并滞留其中<sup>[10, 34-35]</sup>。该观点也得到了最新重力数据的支持:呈高密度异常的太平洋板片前缘基本到达大兴安岭重力梯度带位置<sup>[36]</sup>。较老( $\sim 120$  Ma, 较冷)的太平洋板块以较快速度( $8 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1} \sim 9 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ )俯冲至欧亚大陆之下<sup>[37]</sup>,由于俯冲板片具有较大的热参数值,其地壳以及上地幔矿物有能力把相当一部分水以结构水的方式存储在辉长岩和橄榄岩中<sup>[38]</sup>,使其俯冲至浅部地幔( $\sim 200$  km)时无法完全脱水,并将剩余部分带入过渡带底部。由于受到深部持续加热以及部分区域的上升流热作用和深部地震作用,滞留板片继续进行脱水反应<sup>[39-42]</sup>,导致板片之

上的矿物密度降低。最终湿物质在浮力的作用下运移到过渡带顶部<sup>[43-44]</sup>

矿物物理实验表明,410 间断面处的平均地幔温度在 1 500 K( $\sim 1\ 227\ ^\circ\text{C}$ )<sup>[45-46]</sup>。受到冷的太平洋俯冲板片及其释放的含水物质的影响,中国东北地区之下的过渡带顶部很有可能呈现区域性低温异常( $\leq 1\ 200\ ^\circ\text{C}$ )<sup>[19]</sup>。在该低温环境下拥有 20 km $\sim$ 25 km 厚的 410 间断面,意味着含水量 $>0.5\ \text{wt}\%$ ,此时间断面顶部的矿物相可能处于或高于流体饱和状态,湿固相线的温度显著降低,进而发生部分熔融<sup>[6]</sup>。当矿物晶体结构中的二面角减小到接近  $0^\circ$  时,晶界会被熔融物质完全润湿并失去强度,使得地震波波速迅速降低并大幅改变岩石导电性<sup>[47-50]</sup>,造成间断面顶部出现低速层和低阻异常<sup>[51-52]</sup>。这些低速层出现在松辽盆地、黄海以及日本海西北部下方,横波速度大约减小了  $2\%\sim 4\%$ <sup>[51, 53-55]</sup>。这里反演得到跨越 410 间断面两侧的 S 波速度增加了 $\sim 6.9\%$ ,从中扣除低速层的影响后与 IASP91 速度模型的速度跃变值( $\sim 4.1\%$ )相当。该处部分流体熔融物质在水的影响下因重力不稳定而继续向上运移,为东北地区板内新生代火山活动提供热量和物质来源。

## 4 结论

笔者利用多频段的 Pds/P 振幅比同时反演获得了中国东北地区 410 间断面两侧的速度变化和间断面的厚度,认为是滞留在过渡带底界面的太平洋板块持续脱水,使 MTZ 顶部的矿物处于饱水状态( $>0.5\ \text{wt}\%$ ),因此该处矿物发生部分熔融,进而形成低速低阻异常,同时使得橄榄石( $\alpha$ )-瓦兹利石( $\beta$ )相变区间显著增厚,即 410 间断面厚度显著增加。在今后的工作中,笔者将尝试把该方法运用于更小的研究区域,进而反映 410 间断面结构的空变化及局部特征。同时或将引入对密度变化敏感的间断面多次反射波震相,对大量实际观测资料进行深入分析和处理,以更好地约束间断面附近的波速和密度结构,探索地幔过渡带的物质组分和动力学过程。

### 参考文献:

[1] RINGWOOD A E. Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(8):

2083-2110.

- [2] FROST D J. The upper mantle and transition zone [J]. *Elements*, 2008, 4(3): 171-176.
- [3] ITO E, TAKAHASHI E. Post spinel transformations in the system  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4-\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  and some geophysical implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B8): 10637-10646.
- [4] BINA C R, HELFFRICH G. Phase transition Clapeyron slopes and transition zone discontinuity topography [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B8): 15853-15860.
- [5] KENNETT B L N, ENGD AHL E R. Travel times for global earthquake location and phase identification [J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 105(2): 429-465.
- [6] FROST D, DOLEJS D. Experimental determination of the effect of  $\text{H}_2\text{O}$  on the 410-km seismic discontinuity [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 256(1/2): 182-195.
- [7] IRIFUNE T, ISSHIKI M. Iron partitioning in a pyrolyte mantle and the nature of the 410km seismic discontinuity [J]. *Nature*, 1998, 392: 702-705.
- [8] 俞春泉, 李娟, 杨凡, 等. 地幔过渡带间断面结构地震学成像研究进展 [J]. *地球与行星物理论评(中英文)*, 2023(3): 318-338.  
YU C Q, LI J, YANG F, et al. Advances in seismic imaging of mantle transition zone discontinuities [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2023 (3): 318-338. (In Chinese)
- [9] 周春银, 金振民, 章军锋. 地幔转换带: 地球深部研究的重要方向 [J]. *地学前缘*, 2010, 17(3): 90-113.  
ZHOU C Y, JIN Z M, ZHANG J F. An important field in the studies of Earth's deep interior [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(3): 90-113. (In Chinese)
- [10] FUKAO Y, OBAYASHI M. Subducted slabs stagnant above, penetrating through, and trapped below the 660 km discontinuity [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2013, 118(11): 5920-5938.
- [11] HUANG J L, ZHAO D P. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2006, 111(B9): B09305.
- [12] TAO K, GRAND S P, NIU F L. Seismic structure of the upper mantle beneath eastern Asia from full waveform seismic tomography [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(8): 2732-2763.
- [13] AI Y S, ZHENG T Y, XU W W, et al. A complex

- 660 km discontinuity beneath Northeast China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 212(1/2): 63–71.
- [14] LI J, CHEN Q F, VANACORE E, et al. Topography of the 660km discontinuity beneath Northeast China: Implications for a retrograde motion of the subducting Pacific slab[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1): L01302.
- [15] LIU Z, NIU F L, CHEN Y J, et al. Receiver function images of the mantle transition zone beneath NE China: New constraints on intraplate volcanism, deep subduction and their potential link[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 412: 101–111.
- [16] WANG X, LI J, CHEN Q F. Topography of the 410 km and 660 km discontinuities beneath the Japan Sea and adjacent regions by analysis of multiple - ScS waves[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2017, 122(2): 1264–1283.
- [17] TIAN Y, ZHU H X, ZHAO D P, et al. Mantle transition zone structure beneath the Changbai volcano: Insight into deep slab dehydration and hot upwelling near the 410 km discontinuity[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2016, 121(8): 5794–5808.
- [18] ZHANG R Q, GAO Z Y, WU Q J, et al. Seismic images of the mantle transition zone beneath Northeast China and the Sino-Korean craton from P-wave receiver functions[J]. *Tectonophysics*, 2016, 675: 159–167.
- [19] 杨凡, 张涵, 李娟, 等. 利用接收函数散射核方法探测中国东北地区地幔转换带界面三维形态[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(12): 4406–4424.  
YANG F, ZHANG H, LI J, et al. Topography of mantle transition zone discontinuities beneath Northeast China imaged by receiver function with Ps scattering kernel[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(12): 4406–4424. (In Chinese)
- [20] ASTER R C, BORCHERS B, THURBER C H. *Non-linear inverse problems[M]*. *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 257–278.
- [21] 陈凌, 王旭, 王新, 等. 接收函数界面和波速成像研究进展与展望[J]. *地球与行星物理论评*, 2022, 53(6): 680–701.  
CHEN L, WANG X, WANG X, et al. Advances and perspectives for receiver function imaging of the Earth's internal discontinuities and velocity structures [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, 53(6): 680–701. (In Chinese)
- [22] BONATTO L, PIROMALLO C, COTTAAR S. The transition zone beneath westargentina—central Chile using P-to-S converted waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(8).
- [23] HELFFRICH G, BINA C R. Frequency dependence of the visibility and depths of mantle seismic discontinuities[J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(24): 2613–2616.
- [24] 薛静, 于欣鑫, 李君. 基于多频段 Pds 波振幅的地幔过渡带间断面横波速度结构反演方法及应用[J]. *太原理工大学学报*, 2022, 53(4): 640–648.  
XUE J, YU X X, LI J. Inversion and application of shear velocity structure near transition zone discontinuities based on multiband pds amplitude[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2022, 53(4): 640–648. (In Chinese)
- [25] AI Y, ZHENG T. NCISP3[DS]. *International Federation of Digital Seismograph Networks*, 2003, [https://doi.org/10.7914/SN/ZX\\_2003](https://doi.org/10.7914/SN/ZX_2003).
- [26] AI Y, HE Y. NCISP6[DS]. *International Federation of Digital Seismograph Networks*, 2007, [https://doi.org/10.7914/SN/1A\\_2007](https://doi.org/10.7914/SN/1A_2007).
- [27] HAMMOND J. Mt. Paektu Seismic Network [DS]. *International Federation of Digital Seismograph Networks*, 2013, [https://doi.org/10.7914/SN/1U\\_2013](https://doi.org/10.7914/SN/1U_2013).
- [28] GRAND S, NI J. Collaborative Research: Northeast China Extended Seismic Array: Deep subduction, mantle dynamics and lithospheric evolution beneath Northeast China[DS]. *International Federation of Digital Seismograph Networks*, 2009, [https://doi.org/10.7914/SN/YP\\_2009](https://doi.org/10.7914/SN/YP_2009).
- [29] 吴庆举, 田小波, 张乃铃, 等. 用 Wiener 滤波方法提取台站接收函数[J]. *中国地震*, 2003, 19(1): 41–47.  
WU Q J, TIAN X B, ZHANG N L, et al. Receiver function estimated by Wiener filtering[J]. *Earthquake Research In China*, 2003, 19(1): 41–47. (In Chinese)
- [30] ZHU L P. Crustal structure across the San Andreas Fault, southern California from teleseismic converted waves[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(1): 183–190.
- [31] EFRON B, TIBSHIRANI R. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy [J]. *Statistical Science*, 1986, 1(1).
- [32] HELFFRICH G. Topography of the transition zone

- seismic discontinuities [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(1): 141—158.
- [33] 张炎, 钮凤林, 宁杰远. 基于程函方程与三维速度模型的中国东北地区地幔过渡带接收函数研究[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(8): 2945—2959.  
ZHANG Y, NIU F L, NING J Y. Mantle transition zone beneath Northeast China imaged by receiver function data using fast marching eikonal solver based 3—D migration[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(8): 2945—2959. (In Chinese)
- [34] 田有, 马锦程, 刘财, 等. 西太平洋俯冲板块对中国东北构造演化的影响及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(3): 1071—1082.  
TIAN Y, MA J C, LIU C, et al. Effects of subduction of the Western Pacific plate on tectonic evolution of Northeast China and geodynamic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(3): 1071—1082. (In Chinese)
- [35] 赵大鹏, 雷建设, 唐荣余. 中国东北长白山火山的起源: 地震层析成像证据[J]. *科学通报*, 2004, 49(14): 1439—1446.  
ZHAO D P, LEI J S, TANG R Y. Origin of Changbai Mountain volcano in Northeast China: Evidence from seismic tomography [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(14): 1439—1446. (In Chinese)
- [36] 马国庆, 孟庆发, 王泰涵. 基于重力数据特征的东北地区深部动力机制解析[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(3): 1083—1092.  
MA G Q, MENG Q F, WANG T H. Deep dynamics analysis in Northeast China based on features of gravity data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(3): 1083—1092. (In Chinese)
- [37] 臧绍先, 宁杰远. 西太平洋俯冲带的研究及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, 1996, 39(2): 188—202.  
ZANG S X, NING J Y. Study on the subduction zone in Western Pacific and its implication for the geodynamics[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1996, 39(2): 188—202. (In Chinese)
- [38] VAN KEKEN P E, HACKER B R, SYRACUSE E M, et al. Subduction factory: 4. Depth—dependent flux of H<sub>2</sub>O from subducting slabs worldwide [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116 (B1): B01401.
- [39] TANG Y C, OBAYASHI M, NIU F L, et al. Changbaishan volcanism in Northeast China linked to subduction—induced mantle upwelling[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7: 470—475.
- [40] GUO Z, WANG K, YANG Y J, et al. The origin and mantle dynamics of quaternary intraplate volcanism in Northeast China from joint inversion of surface wave and body wave [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2018, 123(3): 2410—2425.
- [41] LAI Y J, CHEN L, WANG T, et al. Mantle transition zone structure beneath northeast Asia from 2—D triplicated waveform modeling: Implication for a segmented stagnant slab [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2019, 124(2): 1871—1888.
- [42] ZHAO D P, TIAN Y. Changbai intraplate volcanism and deep earthquakes in East Asia: A possible link? [J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 195(2): 706—724.
- [43] GUO X Z, YOSHINO T. Electrical conductivity of dense hydrous magnesium silicates with implication for conductivity in the stagnant slab [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 369/370: 239—247.
- [44] LITASOV K, OHTANI E. Phase relations and melt compositions in CMAS - pyrolyte - H<sub>2</sub>O system up to 25 GPa [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2002, 134(1/2): 105—127.
- [45] KATSURA T, SHATSKIY A, MANTHILAKE M A G M, et al. Thermal expansion of forsterite at high pressures determined by *in situ* X—ray diffraction: The adiabatic geotherm in the upper mantle [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 174(1/2/3/4): 86—92.
- [46] KAWAMOTO T. Experimental evidence for anhydrous transition zone in the early Earth's mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 142(3/4): 587—592.
- [47] YOSHINO T, MATSUZAKI T, SHATSKIY A, et al. The effect of water on the electrical conductivity of olivine aggregates and its implications for the electrical structure of the upper mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288(1/2): 291—300.
- [48] LAUMONIER M, FARLA R, FROST D J, et al. Experimental determination of melt interconnectivity and electrical conductivity in the upper mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 463: 286—297.
- [49] NOVELLA D, FROST D J, HAURI E H, et al. The distribution of H<sub>2</sub>O between silicate melt and nominally anhydrous peridotite and the onset of hydrous melting in the deep upper mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 400: 1—13.
- [50] YOSHINO T, NISHIHARA Y, KARATO S I. Complete wetting of olivine grain boundaries by a hy-

- drous melt near the mantle transition zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 256(3/4): 466–472.
- [51] HAN G J, LI J, GUO G R, et al. Pervasive low-velocity layer atop the 410-km discontinuity beneath the northwest Pacific subduction zone: Implications for rheology and geodynamics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 554: 116642.
- [52] 李世文, 翁爱华, 李建平, 等. 三维电性结构揭示的中国东北地区新生代火山深部起源[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(4): 538–552.
- LI S W, WENG A H, LI J P, et al. Deep origin of Cenozoic volcanoes in Northeast China revealed by 3-D electrical structure [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2020, 50(4): 538–552. (In Chinese)
- [53] MA J C, TIAN Y, LIU C, et al. P-wave tomography of Northeast Asia: Constraints on the Western Pacific plate subduction and mantle dynamics [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2018, 274: 105–126.
- [54] 王秀姣, 韩光洁, 李娟. 西北太平洋俯冲地区 410-km 间断面上覆低速层探测[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(3): 819–831.
- WANG X J, HAN G J, LI J. Low-velocity layer atop the upper mantle transition zone in Northwest Pacific subduction zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(3): 819–831. (In Chinese)
- [55] TAUZIN B, KIM S, KENNETT B. Pervasive seismic low-velocity zones within stagnant plates in the mantle transition zone: Thermal or compositional origin? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 477: 1–13.

## Structure of the 410 discontinuity in Northeast China and its dynamic enlightenment

WANG Xiaohu, XUE Jing

(School of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The mantle transition zone is an important water storage reservoir on the Earth. The sharpness of the mantle discontinuities and the seismic wave velocity jump across the discontinuities can provide essential constraints on the water content and mineral composition near the transition zone. In this study, we extract the amplitude of multi-band Pds conversion wave from the open seismic data recorded by four temporary arrays in Northeast China. We simultaneously obtain the shear wave velocity jump across the 410-km discontinuity and its sharpness using the Markov Chain Monte Carlo method (MCMC). The results show that the sharpness of 410 discontinuity in this area has reached  $\sim 25$  km, and the shear wave velocity has increased  $\sim 6.9\%$  in this depth interval. We believe that the continuous dehydration of the Pacific plate at the bottom of the transition zone increased the water content at the top of the transition zone ( $> 0.5$  wt. %), which made the minerals at or above the state of fluid saturation, resulting in partial melting of the minerals, forming low-velocity and low-resistivity anomalies, and at the same time, significantly thickening of the 410 discontinuity compared with that without water ( $\sim 7$  km).

**Keywords:** Northeast China; receiver function; Markov chain Monte Carlo method; 410 km discontinuity; water content